

MLE공법을 적용한 하수처리장의 온실가스 배출량 산정과 배출계수의 개발 연구

오원기[†] · 추용엽 · 정영민 · 김광구 · 진병복*

한국산업기술시험원, *환경관리공단

Estimating the Greenhouse Gases Emission Rates and their Emission Factors of a Wastewater Treatment Plant with an MLE Process

Won-ki O[†], Yong-yeop Choo, Young-min Jung, Kwang-koo Kim, and Byong-bok Jin*

Korea Testing Laboratory, Environmental Mmanagement Corporation*, Seoul 152-718, Korea
Environmental Research Complexm, Incheon 404-708, Korea

Received February 2009, accepted June 2009

In this study, green house gas emission from a wastewater treatment plant (WWTP) was estimated as a part of a project to build a national greenhouse gas inventory. Gas from the WWTP under study, which was employing an MLE process was collected with a dynamic flux chamber, and methane(CH₄) and nitrou oxide(N₂O) in the gas were analyzed with a NDIR. The emission rates of CH₄ and N₂O from a primary sedimentation tank were 9,876.87 µg/min and 2,352 µg/min, respectively. Emission factors of CH₄ and N₂O of the plant were 0.1089 kgCH₄/kgBOD₅ and 0.0414 kgN₂O/kgTN, respectively.

Key words: Greenhouse Gas Inventory, Emission Factor, MLE, Dynamic Flux Chamber

1. 서 론

인간의 산업 활동으로 인해 온실가스의 발생량은 꾸준히 증가하였다. 대표적 온실가스인 이산화탄소의 대기 중 평균 농도는 1960년 약 313 ppm에서 2005년에 375 ppm 까지 증가하였으며(Manna Loa, NOAA), 증가된 온실가스는 20세기 중반이후 관찰된 지구 평균 기온 상승과 이상기후 현상의 주요 원인이 되었다(IPCC). UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)는 대기 중의 온실가스 농도를 안정화하기 위한 목적으로 기후변화협약을 체결하였고(1988), 이에 따라 각 협약국들은 온실가스 발생량을 산정하여 인벤토리를 마련하고 정책에 활용하는 기후변화협약의 공동이행 의무를 이행해야 한다(제4조 및 제12조).

우리나라 역시 공동이행 의무사항인 국가 온실가스

인벤토리를 구축하여 왔다. 온실가스 인벤토리는 온실가스 배출총량을 산정하기 위하여 작성한 분야별 온실가스 발생량의 축적 자료로 IPCC 가이드라인에 따라 폐기물, 에너지, 산업, 임업, 농업 등으로 구분하여 해당분야의 온실가스 발생량과 배출계수를 개발하였다. 메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)는 하·폐수분야에서 발생하는 온실가스로 IPCC 가이드라인의 폐기물분야에 속한다. 하폐수분야 온실가스 발생량의 산정식은 활동도 자료(Activity data)와 메탄 및 아산화질소의 배출계수(Emission factor)의 곱으로 나타낼 수 있다. 활동량 자료는 프로세스를 유입하는 온실가스 원인 물질의 총 유입량에 관한 자료이며 배출계수는 유입 물질에 대하여 온실가스로 배출되는 가스의 비이다. 따라서 배출계수의 신뢰성은 배출총량의 정확도에 큰 영향을 끼친다.

온실가스 배출계수의 개발은 현장측정 자료를 기반으로 한다. 따라서 하·폐수처리시설을 배출특성별로

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-(0)2-860-1662, Fax: +82-(0)2-860-1667, E-mail: oh0071@hanmail.net

구분하여 대표적인 처리시설을 선정하고, 현장측정을 통해 각 시설에 대한 배출계수를 개발하는 순서로 연구가 진행되었다. 국내 온실가스 배출계수 개발을 위한 현장측정 및 조사 연구로는 하수처리장에서 발생하는 메탄에 대하여 회수 전, 후의 배출계수를 개발한 연구(환경부, 2002)와 활성슬러지, 5-Stage, Denipho 등의 처리시설에서 메탄발생량을 조사한 연구(국립환경과학원, 2007)가 있다. 이와 같이 비교적 다양한 공법에 대하여 온실가스 배출계수를 개발하였지만 각 연구에서 통일된 시료채취 및 분석방법이 적용되지 않아 측정값의 정확성을 확인할 수 없었으며, 전체 공정에 대하여 일부의 선택 공정에서만 온실가스를 측정하였기 때문에 제시된 배출계수를 서로 비교분석하는데 한계가 있었다. 또한 현재까지의 연구는 메탄 발생량만 측정하여 아산화질소의 발생량에 대한 자료를 찾는데 어려움이 있었다. 따라서 아산화질소 포함하여 하·폐수처리시설의 온실가스 발생량의 측정 및 조사에 보다 정확하고 신뢰성 있는 접근 방법이 요구되었다.

온실가스 배출계수의 신뢰성을 높이기 위해서는 대표성을 지닌 처리장을 선정하고 이를 대상으로 정확한 온실가스 측정이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 온실가스 발생량에 대한 대표성을 지닌 하수처리장을 연구 대상 하수처리시설로 선정하고 모든 프로세스에서 발생하는 아산화질소와 메탄의 온실가스 배출량 및 배출계수를 산정하였다. 또한 하·폐수분야 온실가스 표준 측정 절차서(Standard Operating Procedure)에 따라 온실가스 시료를 채취하고 분석하여 온실가스 측정 분석 및 배출계수의 신뢰성을 높이고자 하였다(환경관리공단, 2008).

2. 실험 방법

2.1. 대상 하수처리장의 선정

강화된 배출수 수질기준을 따르기 위해 국내 하수처

리장의 3차(고도)처리를 적용하는 비율이 증가하였다. 전체 하수처리량 중 2차(생물학적)처리의 비율 지난 2000년 94.8%에서 2006년 65.4%까지 감소하였으나, 3차처리 비율은 같은 기간 동안 1.2%에서 26.6%까지 증가하였다(환경부, 2007). 따라서 변화된 수처리 환경을 반영할 수 있도록 3차처리에 대한 배출계수의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 3차처리를 적용한 하수처리장 중 하수처리 프로세스와 처리유량에 대한 대표성을 지닌 하수처리장을 조사대상 하수처리장으로 선정하였다. 하수의 고도처리방법은 크게 A2O, Media, SBR, 미생물 및 기타 처리법으로 구분할 수 있으며, 이 중 A2O계열은 3차 처리를 적용한 총 234개소의 국내 하수처리장 중 86개소(36.8%)에서 적용하여 처리유량은 66.4%에 달하였다(환경부, 2007).

인천광역시에 위치한 대상하수처리장은 A2O계열에 속한 MLE공법을 주처리 프로세스로 하수를 처리하고, 일부 프로세스에는 A2O공법을 시범 적용하였다. 따라서 A2O공법과 MLE공법의 프로세스별 온실가스 발생량의 비교가 가능하며, 일평균 처리유량이 17만 톤 이상으로 온실가스발생량에 대한 대표성을 지녔다고 할 수 있다.

2.2. 대상 하수처리장 개요

대상 하수처리장은 인근지역의 하수와 함께 음식물 처리수가 연계하여 유입되었고, 유입수는 침사지, 분배조, 1차침전지, 생물반응조(무산소조, 호기조), 2차침전지의 프로세스로 처리하여 방류되었다. 지하 3층 정도의 깊이에 위치한 침사지는 총 6지로 구성되었으며, 각 지는 폭 2.4 m, 길이 18 m의 장방형 수평류식이었다. 1차침전지부터 2차침전지까지 기존 및 신설 계열로 구분할 수 있다. 기존계열은 총 3계열로 각 계열 당 8지로 구성되었고, 신설계열의 6지와 함께 총 32계열에서 하수를 처리하였다. 기존의 1차침전지, 무산조, 폭기조

Table 1. The specification of the tested wastewater treatment plant in this study

	Girt Chamber	Primary Sedimentation Tank	Anoxic Tank	Airation Tank	Final sedimentation Tank
The No. of Chamber	6	24	24	24	12
W(m)	2.5	8	8	8	.
L(m)	18	36	24	36	.
r(m)	32
Area(m ²)	45	288	192	288	804
Total Area(m ²)	270	6,912	4,608	6,912	9,651

는 폭 8m의 일정한 프로세스로 하수를 연속으로 처리 하였으나, 각조의 길이는 36, 24, 26m로 차이를 두어 하수의 체류시간을 다르게 하였다. 이후 각 지의 처리 수는 해당 계열의 지름 32m의 원형 2차침전지로 유입 되었다.

2.3. 온실가스 측정방법

2.3.1. 시료채취 및 분석 장비

2.3.1.1. 시료채취 장비(플럭스 챔버)

플럭스 챔버는 지면이나 수면으로부터의 기체의 발 산량을 측정에 적용되는 시료채취 방법이다. 가스 발산 량을 측정하고자 하는 표면에 챔버를 설치하고 챔버 내 부로 이동가스를 유입시킨다. 이때 챔버 내부의 수표면 에서는 액체와 대기사이의 농도구배가 생기고, 수중의 가스는 챔버내 농도의 평형을 유지하기 위해 대기로 발 산된다. 수중의 가스는 Henry의 법칙에 따라 발산되어 챔버 내에서 유입가스와 혼합된다. 챔버 내 혼합가스를 정량펌프로 일정한 유속으로 채취하고 분석하면 가스 의 표면 발산량을 측정할 수 있다.

하수처리 프로세스에서 발생하는 온실가스의 배출량 을 조사하기 위해 다이내믹 플럭스 챔버(Dynamic Flux Chamber)로 수표면에서 발산하는 가스 시료를 채취하였다. 시험에 적용된 플럭스 챔버는 Polycarbonate 재질의 부피 15 L의 반구형으로 제작하였으며, 챔버의 둘레에는 튜브를 장착하여 수표면에 부유가 가 능하도록 하였다. 챔버 하부의 면적은 0.1288 m²이다.

플럭스 챔버에는 Thermocouple과 압력관을 장착하여 챔버내 온도와 압력을 플럭스 챔버 콘트롤러(DrFCC-2000)로 실시간 확인하였으며, 측정된 온도와 압력은 온 실가스의 현장측정치와 함께 자료수집장치(Dooil Tech, EMS-365)에 자동 저장하였다.

2.3.1.2. 시료 분석 장비

플럭스 챔버로 채취한 온실가스(CH₄, N₂O)의 농도는 비분산적외선분석기(NDIR)를 이용해 현장에서 측정하 였다. 또한 현장 시료를 테들러백으로 포집하여 실험실 의 가스크로마토그래피(GC)로 분석치와 비교하였다. 현 장측정에는 SIEMENS사의 ULTRAMAT 6의 비분산적 외선분석기를 적용하였으며 제로(zero) 및 스패(span)가 스로 교정한 후 시료를 분석하였다. 실험실 분석을 위 한 가스크로마토그래피의 경우 CH₄의 분석에는 불꽃염 화이온화검출기(FID)를사용하였으며, N₂O는 전자포획 형검출기(ECD)를 적용하였다.

Table 2. Zero and Span gases for calibration gases for NDIR detector

Zero	Span
N ₂ : 99.999 %	CH ₄ : 103.7 ppm
O ₂ ≤ 1 ppm	N ₂ O: 95.85 ppm
Total hydro carbon ≤ 0.5 ppm	O ₂ : 20.37%
H ₂ O ≤ 0.5 ppm	

Table 3. The Specifications of Pressur gage and The temperature used in this study

	Pressure	Temperature
Type	Ceraphire	K-type
Range	200 kPa	-20~100°C
Accuracy	±0.075%	±0.5°C

2.3.2. 시료의 채취 지점의 선정

대상하수처리장을 각 공정별로 구분하고 모든 공정 에 대한 온실가스 발생량을 측정하였다. 우선 하수처리 공정과 슬러지 처리공정으로 구분하여, 하수처리공정은 침사지, 1차침전지, 무산소조, 폭기조 및 2차침전지로 슬러지처리공정은 농축조 및 소화조의 처리공정으로 구 분하였다.

침사지는 일반하수가 유입하는 1~5지와 음식물처리 수가 유입하는 6지로 구성된다. 이중 4지, 5지, 6지에 서 시료를 채취하였으며, 스크린 하부 약 2 m 지점의 직사각형 맨홀을 시료 채취지점으로 정하였다. 침사지 를 통한 하수는 1차침전지부터 폭기조까지 일련의 프 로세스로 처리되었다. 총 32개지 중에서 복개하여 운영 되는 신설계열을 제외하고, 기존의 2, 3계열의 4, 5지 의 프로세스에서 온실가스 농도를 측정하였다. 1차침전 지는 스크 제거용 스크레머가 보이는 부분과 유출위어 가 보이는 부분으로 나누어 각각 전단과 후단으로 구 분하였다. 무산소조 역시 중앙에 설치된 벽을 기준으로 1차침전지에 접한 곳과 폭기조에 접한 곳을 각각 전단 과 후단으로 나누었다. 나머지 외형적 특징으로 구분할 수 없는 처리조는 현장의 상황을 고려해 시료채취지점 이 최대한 조의 중앙에 위치하도록 하였다.

슬러지처리공정 중 원심농축조는 측면의 덮개를 열 고 농축조내 슬러지 표면의 온실가스 시료를 채취하였 으나, 소화조의 경우 저장탱크로 유입하기 전에 설치된 탈황시설의 가스배관 측정구에서 소화가스를 시료로 채 취하였다.

2.3.3. 시료의 채취

플럭스 챔버를 시료채취지점에 띄우고, 챔버가 유속

에 의해 이동하지 않도록 고정하였다. 챔버의 하부가 수면에 잠겨있는지 확인한 후 유입가스를 5 L/min의 일정한 유속으로(Gholson, 1989) 플럭스 챔버에 유입시키고, 챔버내 온도와 압력이 안정화되었을 때 정량펌프로 1 L/min의 유속으로 가스 시료를 채취하였다. 시험에 적용된 이동가스는 Ar가스(99.99%, 13 MPa at 356°C)로 하였다.

플럭스 챔버의 유입 및 유출가스의 흐름이 안정한지 확인한 후 이동가스의 챔버내 체류시간(t)에 해당하는 시간간격으로 이동가스의 유량, 챔버의 내부 및 외부의 온도, 압력을 측정하고 기록하였다. 플럭스 챔버는 이동가스 체류시간(t)의 4배가 될 때 안정된 상태(EPA Guideline)가 되므로 이때의 시료를 채취하여 이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 농도를 측정하였다. 시료의 분석 및 포집 작업이 완료되면 플럭스 챔버 및 연결관의 오염여부를 확인하고 세척한 후 다음의 채취장소로 이동하였다.

2.3.4. 가스발생량의 계산

대상 하수처리시설을 처리 공정별로 구분하고 각 공정에서 발생하는 온실가스량을 합하여 전체 발생량을 산정하였다. 각 시료채취지점의 온실가스 발생량은 해당 공정을 대표한다고 가정하여, 측정된 메탄과 아산화질소의 농도를 해당 공정의 표면발산량으로 환산하였다. i 지점의 메탄 및 아산화질소의 유출속도 계산식은 다음과 같다(EPA, 1986).

$$Er_i = \frac{C_i \cdot M_w \cdot P \cdot FR}{R \cdot T}$$

Er_i : i 지점의 메탄 또는 아산화질소의 유출속도($\mu\text{g}/\text{min}$)

C_i : i 지점의 메탄 또는 아산화질소의 측정농도(ppmv)

M_w : 메탄 및 아산화질소의 물질량(CH_4 : 16 g/mole, N_2O : 44 g/mole)

P : 측정지점의 챔버내부 압력(atm)

FR : 챔버로 유입된 이동가스 유량(L/min)

R : 이상기체상수(0.082 atm·L/mole·K)

T : 플럭스 챔버내부의 절대온도(K)

3. 결과 및 고찰

메탄(CH_4)과 아산화질소(N_2O)는 하·폐수분야에서 발생하는 대표적인 온실가스이다. 하수에 포함된 유기탄소원이 혐기성 상태에서 분해되면 메탄으로 대기 중에 방출된다. 또한 하수의 암모니아성 질소는 질산화 및 탈질과정을 거치면서 질소로 대기에 배출된다. 이때 아산화질소가 함께 발생하는 것으로 추정된다(EPA, 2006). 본 연구에서는 하수처리과정에서 발생하는 온실가스인 메탄과 아산화질소의 발생량을 계절별, 공정별로 구분해 측정하여 해당공정의 배출계수를 산정하였다.

3.1. 전처리공정(침사지)의 온실가스 발생량

총 6지로 구성된 침사지는 콘크리트 벽으로 구분되어 유입수는 지간 혼합없이 독립적으로 흘렀다. 음식물처리수는 침사지 상부의 탱크에 저장되고, 각 조로 연결된 수문으로 연계되었다. 시료채취 당시 음식물처리수는 침사6지로만 유입하였다. 따라서 Table 4의 침사6지는 연계수인 음식물처리수의 온실가스 측정치이며, 침사4지와 5지는 유입하수에 대한 측정치이다. 침사4지와 6지의 시료는 10월 중순에 이루어 졌으며, 침사5지는 11월 중순에 시료를 채취하였다.

3.1.1. 침사지

3.1.1.1. 침사지 온실가스 발생량의 영향 요소

침사지에서의 온실가스 발생량을 산정하여 유입수의 유기물 농도와 온실가스 발생량의 관계를 조사하였다. 음식물처리수가 직접 유입하는 침사6지에는 시료채취 당시 수많은 모기와 파리 등 해충이 집중 번식하였다. 침사6지의 메탄과 아산화질소의 현장측정 농도는 각각 5,016.0 ppm과 436.3 ppm으로 침사4지와 5지에 비하여 메탄 및 아산화질소의 농도가 높았다(Table 4). 침사6지는 침사4지에 비해 이산화탄소의 농도는 2배가량, 메탄 및 아산화질소의 농도는 10배가량 높은 측정치이다. 유기물 농도가 높은 음식물처리수가 유입되는 경우 온실가스 발생량이 많음을 확인할 수 있다.

측정온도와 온실가스 발생량의 관계는 침사4지와 5

Table 4. The concentrations of Greenhouse gas at the grit chambers

unit: ppmv

Grit Chamber	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Temp.(°C)
4th	596.9	496.8	47.4	23.3
5th	455.0	108.4	14.0	13.9
6th	1,047.1	5,016.0	436.9	20.9

지를 비교하여 확인할 수 있다. 침사4지와 5지는 일반 하수가 유입하는 곳으로 유입수의 유기물 농도차이가 크지 않을 것으로 판단할 수 있다. 하지만 11월 중순에 시료를 채취한 침사5지의 이산화탄소는 10월의 측정치인 4지에 비해 23.77% 감소하였으며, 메탄 및 아산화질소는 각각 78.18% 및 70.45% 감소하였다. 시료를 채취한 10월(침사4, 6지)과 11월(침사5지)의 챔버내 온도는 10°C 가량 차이가 났으며, 이를 고려할 때 측정 지점의 온도차이로 인한 온실가스 농도가 차이가 나는 것으로 판단할 수 있다.

하수에 포함된 분해 가능한 유기물의 양은 메탄발생량을 결정하는 주요 요소이며, 온도는 메탄생성미생물(methanogens)의 활성화에 영향을 준다(IPCC G/L). 따라서 하·폐수분야에서 발생하는 온실가스인 이산화탄소, 메탄, 아산화질소는 하수의 유기물농도와 온도에 영향을 받는다. 이때 메탄과 아산화질소는 이산화탄소에 비해 유입수의 유기물농도와 온도에 큰 영향을 받음을 확인하였다.

3.1.1.2. 침사지의 온실가스 Flux

침사4지와 5지의 온실가스 발산량을 산술평균하고, 이를 침사6지와 가중평균하여 침사지 전체의 메탄과 아산화질소의 발산량으로 제시하였다. 침사지의 온실가스 Flux를 단위면적당 발생량으로 환산하여 Table 5에 나타내었다. 계산된 침사지의 온실가스 발산량은 메탄의 경우 3610 µg/min, 아산화질소는 897 µg/min이다.

3.2. 수처리 공정의 온실가스 발생량

1차침전지는 스크래버가 수면위에 보이는 구간을 전단, 유출위어가 보이는 구간을 후단으로 구분하였다. 무산소조는 1차침전지의 잔류 부유물을 제거하기 위해 설치한 가로막을 기준으로 1차침전지 쪽을 전단, 폭기조 쪽을 후단으로 구분하였다. 폭기조에서는 중앙에 위치하는 지점을 선정하여 시료를 채취하였다. A2O공법을 적용한 3계열의 1~4 지를 제외하고 대부분 MLE공법을 주공법으로 하수를 처리하였지만 각 지의 운전조건

은 어느 정도의 차이가 있을 것으로 판단하였다. 각 지의 운전조건에 따른 온실가스 발생량의 차이를 확인하기 위해 1차침전지, 무산소조, 폭기조까지 2계열의 4지와 5지 및 3계열의 4지와 5지에서 온실가스 발생량을 측정하였다.

3.2.1. 수처리 공정별 온실가스 발생량

3.2.1.1. 계열별 발생량 비교

A2O공법이 시범 적용되고 있는 3계열 4지를 제외한 무산소조의 메탄 발산량의 범위는 10.29~32.2 µg/min으로 각 지별 최대 및 최소 측정치는 무산소조의 경우 3배가량 차이가 났으며, 폭기조는 최대 72.64 µg/min와 최소 73.54 µg/min로 2.3배로 지별 차이는 크지 않았다. 하지만 1차침전지의 경우 메탄 발생량은 전, 후단을 포함한 메탄의 최대값은 39,708 µg/min은 최소값 64.14 µg/min의 619배가 높게 조사되었다. 아산화질소 역시 1차침전지에서 각 지별 발생량의 차이가 크게 조사되었다.

Table 6 공정별 메탄 발산량에서 1차침전지의 평균 메탄 발산량은 9,876.84 µg/min로 무산소조의 22.16 µg/min과 폭기조의 44.16 µg/min에 비하여 매우 높았다. 무산소조와 폭기조에 비해 445배 및 223배에 달하며 침사지 3,610.52 µg/min에 비해서도 2.74배의 속도로 메탄이 발산하였다. 아산화질소의 발산량 역시 1차침전지가 2,532.34 µg/min로 가장 높았다. 이는 침사지와 폭기조에 비해 각각 2.82배, 105배이며 무산소조에 비해서는 무려 1,480배의 속도이다. 대상 하수처리장에서의 수처리공정에서 발생하는 메탄과 아산화질소의 주요 발생원은 1차침전지라 할 수 있다.

1차침전지의 메탄 발생량을 전단과 후단으로 구분하였을 때 2계열의 4지와 5지는 후단의 64.14 µg/min와 16,802.20 µg/min에 비해 전단에서 360.65 µg/min와 39,707.55 µg/min로 높았다. 반면 3계열의 5지와 4지는 전단의 761.63 µg/min와 1,564.86 µg/min에 비해 후단이 1,668.50 µg/min와 5,322.42 µg/min로 더 높았다. 1차침전지의 메탄 발산량은 2계열의 경우 전단이 높았으나 3계열의 경우 후단이 더 높다. 아산화질소의 발산량 역시 같은 양상을 보인다. 아산화질소의 발산량은 2계열의 경우 4지와 5지의 전단은 후단에 비해 6.79배 및 2.5배 높으나 3계열의 4지와 5지는 후단이 1.93 배 및 3.0 배 높게 조사되었다(Table 7).

2계열과 3계열의 온실가스(메탄 및 아산화질소)의 발생량의 양상은 각 지의 운전조건의 차이로 발생할 결

Table 5. The mass flux of Greenhouse gas at the grit chambersunit: µg/min

Grit Chamber	CH ₄	N ₂ O
4th	1,635.91	428.98
5th	368.59	130.91
6th (Food Waste Leachate)	16,651.89	3,982.03
Average	3,610.52	896.96

Table 6. The N₂O mass flux at each water treatment process unit: µg/min

Series	Line	Primary Sedimentation Tank		Anoxic Tank		Aeration Tank	Final sedimentation Tank
		1	2	1	2		
2	4th	88.6	13.1	0.0	0.0	20.2	0.6
	5th	10,301.8	4,119.6	0.0	0.0	37.2	0.6
3	4th ¹⁾	471.1	1,411.9	0.0	32.1	27.6	0.8
	5th	228.7	442.2	7.2	3.0	14.7	0.8
Average		2,532.34		1.71		24.05	0.70

1) The 4th Line of Series 3 which is using A₂O was not included to estimate the average values.

Table 7. The CH₄ mass flux at each water treatment process unit: µg/min

Series	Line	Primary Sedimentation Tank		Anoxic Tank		Aeration Tank	Final sedimentation Tank
		1	2	1	2		
2	4th	360.7	64.1	10.3	32.2	31.5	0.0
	5th	39,707.6	16,802.2	31.0	30.9	72.6	0.0
3	4th ¹⁾	1,668.5	5,322.4	3.3	134.4	8.3	0.0
	5th	761.6	1,564.9	13.3	15.3	28.3	0.0
Average		9,876.8		22.16		44.16	0.0

1) The 4th Line of Series 3 which is using A₂O was not included to estimate the average values.

과로 판단된다. 1차침전지의 슬러지는 인양기에 의해 유입부쪽으로 이동하여 정해진 시간 간격(시간당 10~20분 정도)으로 배출되었다. 따라서 2계열의 발산량 결과와 같이 슬러지의 양이 상대적으로 많은 1차침전지의 전단에서 온실가스 발산량이 높아야 한다. 하지만 3계열의 경우 시료채취 당시 슬러지 인양기의 고장으로 슬러지 인발작업이 수동으로 진행되었다. 따라서 1차침전지 전단의 수동 인양작업 및 유수에 의한 슬러지의 후단부 이동으로 후단에 상대적으로 많은 슬러지가 존재할 가능성이 높으며 이로 인해 1차침전지 후단에서 온실가스 발생량이 많았을 것으로 유추할 수 있다.

수처리공정에서 온실가스의 주요 발생원은 1차침전지였으며, 메탄과 아산화질소의 발산량은 처리조의 운전조건에 크게 의존하였다. 따라서 하·폐수분야 온실가스 배출량 및 배출계수의 신뢰성을 높이기 위해 1차침전지의 경우 운전조건을 반영할 수 있도록 구역별로 나누어 측정할 필요가 있다.

3.2.1.2. MLE공법과 A2O공법의 온실가스량 비교

대상 하수처리장은 A2O공법을 3계열 4지에 시범 적용하였다. 본 연구에서는 2차 시료채취시 3계열 4지의 최초침전지, 무산소조, 폭기조의 온실가스 표면 발산량을 측정하여 MLE공법의 온실가스 표면 발산량과 비교하였다. Table 6 및 Table 7의 결과를 보면 3계열 4

지(A2O공법)의 무산소조 후단에서 메탄은 134.42 µg/min 아산화질소는 32.06 µg/min의 속도로 발산하였다. MLE공법이 적용된 2계열 4지와 5지 및 3계열 5지의 경우 메탄발산량은 32.17~15.27 µg/min이며 아산화질소는 0~3.04 µg/min이었다. MLE공법은 무산소조에서 유입하수의 유기물을 이용해 폭기조에서 반송되는 질산성 질소를 제거한다. 따라서 폭기조의 내부반송슬러지는 무산소조의 전단에서 유입하수와 함께 유입된다. 하지만 A2O공법에서는 무산소조 후단으로 직접 내부반송되어 MLE공법에 비해 메탄 및 아산화질소의 농도가 높은 것으로 판단된다.

3.2.1.3. 슬러지량과 온실가스 발생량의 관계

하·폐수분야 온실가스 발생량은 수중 유기물 농도에 비례하여 증가한다. 대상 하수처리장의 경우 유입하수는 음식물처리수와 연계하여 분배조에서 혼합되어 각 계열의 1차침전지로 유입하기 때문에 1차침전지에서 유입수의 유기물 농도 차이는 크지 않다고 가정할 수 있다. 하지만 각 조별 유지되는 슬러지의 양은 서로 다르며 조 내 유기물의 양은 슬러지의 양에 비례하고 볼 수 있다. 따라서 각 조의 1차침전지에서 발산하는 온실가스량은 조내에 존재하는 슬러지의 량과 정량적인 관계가 있을 것으로 판단하였다.

슬러지의 높이가 높을수록 처리조내 슬러지량은 많

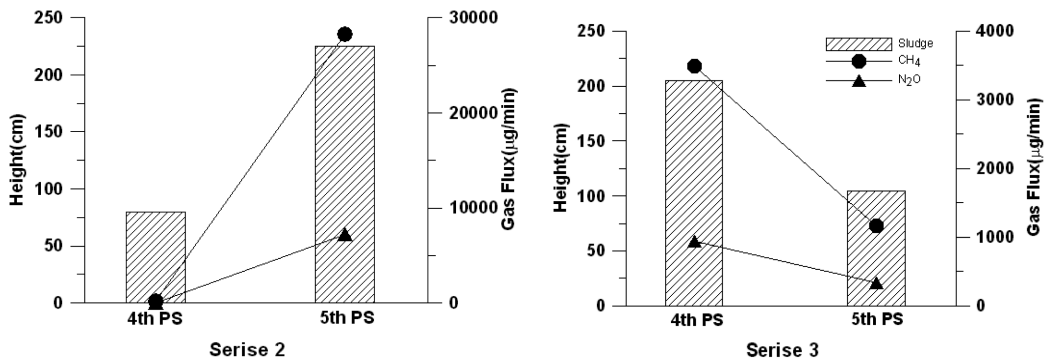


Fig. 1. Comparison between Sludge heights and CH₄ and N₂O Mass flux at Primary clarifiers.

다. 따라서 대상하수처리장의 지별 슬러지 높이를 측정하고 이를 메탄 및 아산화질소 발생량과 비교하였다. 조별 슬러지의 높이는 온실가스 측정의 1일 후 측정치이며, 측정 기간 중 32개 1차침전지의 슬러지 높이는 최소 80 cm에서 300 cm까지 달랐으며 평균 높이는 176.30 cm이었다. 2계열 4지의 슬러지 높이는 80 cm, 5지는 225 cm이며, 3계열의 5지와 4지의 슬러지 높이는 각각 170 cm, 230 cm이다. 슬러지 높이와 온실가스 발생량의 관계를 나타낸 Fig. 1과 같이 슬러지의 높이가 높을수록, 즉 슬러지 량이 많을수록 메탄 및 아산화질소의 발생량이 증가함을 확인할 수 있다. 슬러지 높이와 온실가스 발생의 관계는 처리수 표면사진으로도

확인이 가능하다. Fig. 2는 1차시료채취 시(10월 15일) 2계열 4지와 2계열 5지의 1차침전지 전단에서 처리수의 표면을 찍은 사진이다. 2계열 4지와 5지의 챔버 온도는 각각 20.48°C와 22.33°C로 온도의 차이는 크지 않았다. 하지만 슬러지 높이가 225 cm인 2계열 5지와 88 cm인 2계열 4지의 사진을 비교하면 2계열 5지의 처리수 표면에서 수중의 가스가 기포로 배출되는 모습을 쉽게 관찰할 수 있다.

3.2.1.4. 온도와 온실가스 발생량의 관계

2계열 5지와 3계열 4지의 슬러지 높이는 각각 225 cm와 230 cm로 큰 차이가 없었지만 온실가스 발생량은 각각 39,708 µg/min과 5,322 µg/min로(전단 및 후

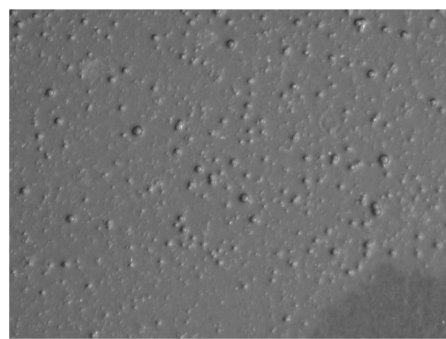
Table 8. The CH₄ and N₂O mass flux at each water treatment process unit: µg/m³

	Waste water treatment processes					Sludge treatment processes	
	Girt Chamber	Primary Sedimentation Tank	Anoxic Tank	Aeration Tank	Final sedimentation Tank	Thickener	Digester
CH ₄	61.29	4,963.16	7.42 ¹⁾	22.19 ¹⁾	0.00	58.83	6.46
N ₂ O	15.23	1,272.51	0.57 ¹⁾	12.08 ¹⁾	3.15	7,213.06	0.00

1) The 5th Line of Series 3 which is using A₂O was not included to estimate the average values.



(a) 4th Line(The hight of sludeg: 80 cm)



(b) 5th Line(The hight of sludeg: 225 cm)

Fig. 2. The surfaces treated water at Primary sedimentation tank of 4th and 5th Line in Serie 2.

단의 최대치) 측정되어 2계열 5지가 7.5배가량 높았다. 이러한 차이는 처리수의 온도에 따른 영향으로 판단된다. 2계열의 온실가스를 발생량을 측정한 10월 15일(1차시료채취)의 대기온도는 25°C이었으나, 3계열의 측정일인 11월 12일(2차시료채취)의 대기온도는 11~14°C 낮았다. 시료채취 당시 챔버의 온도는 2계열 5지의 경우 22.33°C로 3계열 4지의 14.45°C와 8°C가량 차이가 난다. 15°C 이하에서는 메탄생성미생물(methanogens)이 활성화하지 않기 때문에 메탄생성속도는 느려지기 때문에(2006 IPCC G/L) 14.15°C인 3계열 5지의 경우 2계열 5지에 비해 적은 메탄이 생성되었다고 볼 수 있다.

3.2. 슬러지처리공정에서 온실가스 발생량

대상 하수처리장에서 발생한 슬러지는 농축, 소화, 탈수의 프로세스로 처리된다. 2차침전지의 잉여슬러지는 농축조로 이동하여 원심력을 이용하여 농축, 분리된다. 농축된 슬러지는 소화조에서 혐기성균의 작용으로 가스화되고 소화슬러지는 탈수처리 후 반출 처리된다.

슬러지 농축조는 총 3지로 구성되며 각 지의 반지름은 14.5 m이다. 플럭스 챔버를 이용해 측정한 메탄의 표면발산량은 2,016.10 $\mu\text{g}/\text{min}$ 으로 농축조 전체 처리공정에서 유입하수량에 대하여 58.83 mg/m^3 의 메탄이 발생하였다. 아산화질소의 표면발산량은 222.42 $\mu\text{g}/\text{min}$ 으로 유입하수에 대해 6.46 mg/m^3 의 아산화질소가 발생하였다. 소화가스의 탈황전 후의 메탄농도는 큰 차이가 없이 710,000 ppm였으며 일평균 소화가스발생량인 2,712.07 m^3/day 를 고려하면 890.50 g/min 의 속도로 소화조에서 메탄이 발생하였다. 대상 하수처리장의 슬러지처리과정에서 발생하는 메탄은 대부분 소화조에서 발생하였고, 발생된 메탄가스는 전량 탱크에 저장되어 소화조 가운에 소비되었다.

3.3. 온실가스 배출계수

Table 8은 공정별 단위 처리하수의 메탄발생량이다. 공정별 메탄 및 아산화질소의 발산량에 각 처리조의 면적을 곱하고, 처리유량을 나누어 공정별 메탄발생량을 구하였다. 하수처리공정에서 메탄의 총 발생량은 5,054.07 mg/m^3 이며, 슬러지공정은 7,213.06 mg/m^3 이었다. 하수처리공정 중 1차침전지의 비율은 메탄의 경우 98.20%였으며 아산화질소는 97.62%이었으며, 슬러지처리공정 중 농축조의 메탄 발생량은 99.12%에 달하였다. 따라서 대상 하수처리장의 경우 하수처리공정에서

는 1차침전지가 메탄의 주요 발생원이며 슬러지처리공정에서는 농축조가 주 발생원이었다. 단위 처리하수당 메탄의 총 발생량은 하수처리공정과 슬러지처리공정에서 발생하는 생량을 더한 후 소화조 가운용으로 사용되는 소화조의 메탄발생량(7,213.06 mg/m^3)을 차감하였을 때 5,112.90 mg/m^3 로 조사되었다.

대상 하수처리장의 메탄 및 아산화질소의 총 발생량은 5,112.90 mg/m^3 및 1,310.00 mg/m^3 이다. 여기에 유입하수의 BOD부하량인 113.2 mg/L 와 총질소부하량인 31.631 mg/L 을 나누면 대상 하수처리장의 메탄 및 아산화질소의 배출계수를 구할 수 있다. 대상 하수처리장의 메탄배출계수는 총 배출되는 메탄에 대하여 0.1089 $\text{kgCH}_4/\text{kgBOD}$ 이며 소화조의 발생하여 재이용되는 메탄을 제외하면 0.04517 $\text{kgCH}_4/\text{kgBOD}$ 가 된다. 아산화질소의 배출계수는 0.0414 $\text{kgN}_2\text{O}/\text{kgTN}$ 이다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내하수처리장 중에서 MLE공법의 3차처리(고도처리)하수를 처리하는 하수처리사업소를 대상으로 老弓폐수 분야 온실가스 표준측정절차서淡° 따라 시료를 채취, 분석하여 온실가스 배출량을 산정하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

대상 하수처리장의 메탄배출계수는 0.1089 $\text{kgCH}_4/\text{kgBOD}$ 이며 슬러지 소화조의 발생하여 재이용되는 메탄을 제외하면 0.04517 $\text{kgCH}_4/\text{kgBOD}$ 가 된다. 아산화질소의 배출계수는 0.0414 $\text{kgN}_2\text{O}/\text{kgTN}$ 이었다.

대상하수처리장의 경우 1차 침전지의 메탄과 아산화질소 발생량은 9,876.8 $\mu\text{g}/\text{min}$ 과 2,532 $\mu\text{g}/\text{min}$ 으로 수처리공정의 온실가스발생량에서 가장 큰 부분을 차지하였다. 슬러지 처리공정의 경우 소화조에서 890.50 g/min 의 속도로 상당량의 메탄이 발생하였다. 소화조의 메탄은 전량 회수된 후 소화조 가운에 소비되었다.

단위 처리하수당 메탄의 총 발생량은 하수처리공정과 슬러지처리공정의 메탄발생량을 더한 후 소화조 가운용으로 재이용되는 소화조의 메탄발생량(7,213.06 mg/m^3)을 차감하였을 때 5,112.90 mg/m^3 이었다.

대상하수처리장의 경우 MLE와 A2O의 하수처리공정의 차이 그리고 프로세스내 슬러지의 처분과 온도 등 운영조건에 의해서 온실가스 발생량에 변동이 발생하였다. 따라서 배출계수의 개발시 하수처리장의 유기물 부하량, 내부반송 등 운영조건에 대한 정확한 자료를 확보하고 관련 사항을 충분히 고려한 후 현장측정을 진

행해야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 국가온실가스 인벤토리 작성을 목적으로 환경관리공단의 지원을 받아 연구되었습니다. 원활한 연구가 진행될 수 있도록 많은 지원과 도움을 주신 환경관리공단 및 승기하수처리장 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. EPA, 1986, Measurement of Gaseous Emission Rates from Land Surfaces using an Emission Isolation Flux Chamber: User's Guide
2. IPCC, 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
3. Japan, 2008, National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN.
4. USA, 2008, Inventory of U.S Greenhouse Gas Emission and Sink: 1990-2006
5. U.S. Environmental Agency, 2006, Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sink: 1990-2004)
6. 환경관리공단, 2007, 국가배출권할당방안및배출권거래소 구축방안 마련을 위한 조사 연구.
7. 환경관리공단, 2008, 환경부문 온실가스 배출가스 개발 결과 보고서: 하·폐수 분야
8. 환경부, 2002, 환경부문 온실가스 배출량 조사 및 통계구축
9. 환경부, 2008, 인천광역시 승기하수처리장 운영현황
10. 환경부, 2007, 환경통계연감 2007
11. 한국환경정책평가연구원, 2006, 기후변화 영향 평가 및 적응대책 마련을 위한 국가 로드맵 수립.